

当归“辨状论质”品质评价及道地性品质形成研究进展

李春玉, 马晓霞, 刘小莉*

云南中医药大学 云南省教育厅云南特色饮片炮制研究重点实验室, 云南, 昆明 650500

摘要: 当归 *Angelicae Sinensis Radix* 作为药食同源的主要中药材之一, 历史悠久, 应用广泛。传统当归品质评价方法及质量控制体系存在一定的局限性, 而“辨状论质”理论的提出及发展在当归品质评价中极具价值, 已有大量研究依据该理论对当归的品质评价进行了一系列探索。对当归的状-质关联研究进行综述, 并结合现代研究对其背后的品质内涵及其成因进行讨论, 以期对当归的质量评价研究提供参考。

关键词: 当归; 辨状论质; 品质评价; 状-质关联; 品质成因

中图分类号: R286.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2670(2025)03-1104-11

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2025.03.033

Quality evaluation and genuine quality formation of *Angelicae Sinensis Radix* “Quality evaluation through morphological identification”

LI Chunyu, MA Xiaoxia, LIU Xiaoli

Yunnan University of Chinese Medicine, Key Laboratory of Yunnan Provincial Department of Education for Processing Research on Characteristic Prepared Drug in Pieces, Kunming 650500, China

Abstract: *Angelicae Sinensis Radix* (Danggui, ASR) as one of the main Chinese herbal medicines with the medicinal and food homology, maintains long and wide medicinal history. There have some limitations on the traditional quality evaluation method and quality control system of ASR, and the theory of “quality evaluation through morphological identification” has great value in its quality evaluation. There have been a series of researches on the quality evaluation of ASR based on this theory. In this paper, the shape-quality correlation of ASR was reviewed, and the quality connotation and its causes behind it were discussed combing with modern research. The results may aim to provide reference for the quality evaluation of ASR.

Keywords: *Angelicae Sinensis Radix*; quality evaluation through morphological identification; quality evaluation; shape-quality association; quality formation

当归为伞形科植物当归 *Angelica sinensis* (Oliv.) Diels 的干燥根, 具有补血活血、调经止痛、润肠通便的功效^[1]。始载于《神农本草经》^[2], 是我国药食同源的主要中药材之一^[3], 具有悠久的历史 and 广泛的应用, 很多传统的经典名方如四物汤、当归补血汤等都离不开当归^[4-7], 因此有“十方九归”的说法, 被尊为“药王”“血中圣药”等。历代医家对当归的品质具有统一的认识, 即甘肃归品质最好^[8-9], 但 1910 年以来逐渐被引至云南西北部的大理、丽江和维西等地, 并形成了其特色品质, 被誉为“云当归”,

也是“十大云药”之一。

中药材的品质与临床疗效有着密切关系。中药材的品质评价, 一是用于描述药材外观特性的物理参数即外在品质, 如颜色、质地、大小和形态等; 二是化学指标, 也称为内在品质, 涵盖了药效成分的含量以及不同成分的比例、还包括农药、有毒金属等有害物质的含量。质量是中药材的生命线, 直接反映临床疗效, 传统评价质量的方法有手摸、眼看、口尝、鼻闻、水试和火试等, 但这些方法的指标大多依赖于专业人员的经验, 缺少客观性的评价

收稿日期: 2024-05-06

基金项目: 国家中医药管理局全国老药工传承工作室建设项目(赵荣华全国老药工传承工作室); 2022 年医疗服务与保障能力提升补助资金[中医药事业传承与发展部分: 中药炮制技术传承基地建设(云南)](Z155080000004)

作者简介: 李春玉(2001—), 女, 云南大理人, 硕士研究生, 研究方向为中药资源学。Tel: 18387253282 E-mail: 2729467759@qq.com

*通信作者: 刘小莉(1977—), 女, 山东烟台人, 副教授, 博士。Tel: 18087835221 E-mail: kmxunzi@aliyun.com

标准。古人根据中药的特性来评估其品质，并在实践中积累了大量的经验，基于这些经验，生药学家谢宗万教授提出了“辨状论质”的理论^[10]，即通过药材的外观性状特点与其内在品质之间的关系来判断其质量的真伪优劣，该理论的提出，建立在历代医药学家积累总结而成的鉴别中药真伪优劣实践经验的基础之上，其内涵更是数千年来独具特色的中药鉴别理论精华的集中体现。随着中药品质评价现代手段的发展，“辨状论质”的研究也有了新的补充。本文全面综述了当归自古至今的品质评价标准、内涵诠释以及道地性品质形成影响因素，为建立当归质量评价方法提供参考。

1 当归的状-质关联

古人评价当归的外观性状和品质时，常以“不以平地、山中为等差，但肥润不枯燥者佳”^[11]、“以秦归头圆尾多色紫气香肥润者，最胜他处”^[9]等字眼评判。1984 年发布的《七十六种药材商品规格标准》以每千克支数计算全归等级，分为五等。传统上认为当归以根部粗而长，肉饱满，油润，表皮呈黄褐色，断面呈黄白色，有浓郁气味者为优，但这描述缺少特定的参照标准，对客观评价药物品质不利。“辨状论质”是对以往传统经验的总结和概括，将药材外在形态特征与内在质量联系在一起，随着这一理论体系的完善和发展，其状-质关联的实质可被总结为药材的外部性状特征（色、形、气、味），是其内在品质优劣的外在表现。随着科技的进步，机器视觉、嗅觉和味觉等技术被更多地运用于中药材“形色气味”的客观表达中，弥补了传统方法对中药传统品质评价主观性较强的缺陷^[12-13]。

1.1 形-质相关性

“辨状论质”之形，囊括药材形状、大小、质地，它是把商品的规格、性状特征、显微特征与化学成分等联系在一起，以性状特征来间接地对中药的品质进行评价。南北朝隋唐时期初步形成了中药材规格等级划分方法的框架，经过深化扩展沿用至今。李小阳^[14]通过对当归的传统性状指标进行赋值，并与其等级进行相关性分析，发现当归的商品等级与归头直径、归尾数量、全归长度以及质地都存在明显的正相关关系，商品等级愈高，归头直径愈大、归尾数愈多、全归长度愈长、质地柔韧。主成分分析（principal component analysis, PCA）揭示不同商品等级与平均质量和药效成分含量之间的关系，发现当归商品等级与平均质量、生物活性物质含量呈

显著负相关，洋川芎内酯 A 的含量与商品等级呈显著负相关（ $P < 0.01$ ），而平均重量与化学成分无相关性^[15-16]。

《本草经集注》^[17]以产地与性状相结合作为当归品质评价标准的方法，“今陇西叨阳、黑水当归，多肉少枝气香，名马尾当归，稍难得。西川北部当归，多根枝而细”。刘香南等^[18]对甘肃种植当归外观性状的差异进行了分析，并对其与质量的相关性进行了讨论，结果表明：当归根质量，根长，归头长，侧根数及直径等性状与浸出物及阿魏酸的含量之间存在显著相关性（ $P < 0.05$ ）。除性状特征外，杨博文^[19]采用显微技术对“当归类”药材进行鉴定，发现按淀粉粒性状及数目所得淀粉粒常数与其多糖含量呈显著正相关（ $P < 0.01$ ）。

以上研究启示当归的“形”与其有效成分存在部分关联，验证了当归形-质相关性的可靠性，为“辨状论质”中根据药材形状判断其品质的观点提供了科学依据。

1.2 色-质相关性

“辨状论质”之色是指色泽，其关键在于明确中药材中各类指标性成分的物理特性。“色变则味变，味变则质变”，药材内部物质的变化一定程度反映在颜色的改变上。《本草蒙笙》^[20]记载：“生秦蜀两邦，有大小二种。大叶者名马尾当归，黄白气香肥润（此为上品）；小叶者名蚕头当归，质黑气薄坚枯（此为下品，不堪入药）。”徐曼菲等^[21]2016 年提出了“辨色论质”的理论，即色泽与中药药性、有效组分含量均呈现相关性。目前颜色的量化表征方法包括比色法、色卡法、分光光度计法、色差仪测定法、数码相机与计算机图像技术相结合法等。

任伟光等^[22]使用超高效液相色谱技术来测定当归中阿魏酸等成分的含量，并通过劳尔比色卡来比较当归的颜色，从而发现当归的颜色与其药用成分之间存在关联；阿魏酸、洋川芎内酯 A、藁本内酯 L 和丁烯基苯酞与颜色值之间存在明显的正相关性，而正丁基苯酞与颜色值之间并没有明显的相关性。色差仪作为基于空间色度值最为常用颜色量化工具，在辨色论质中应用日益广泛^[23-24]。高慧等^[25]利用色度仪对酒当归粉末颜色值进行测量，发现酒当归样品阿魏酸含量与颜色红绿方向（ a^* ）、颜色黄蓝方向（ b^* ）呈正相关（ $P < 0.01$ ），醇浸出物含量与明度（ L^* ）、总色值（ E^*_{ab} ）呈负相关（ $P < 0.01$ ），水浸出物含量与 L^* 呈负相关（ $P < 0.05$ ），多糖含量与

L^* 呈正相关 ($P < 0.05$)。洪婉敏等^[26]对当归的各个部位在炒焦过程中的样品色度值 (L^* 、 a^* 、 b^*) 进行了测量, 并观察到当归在不同部位炒焦时的色度值存在 L^* 、 b^* 以归身最大, 归尾居中, 归头最小, a^* 以归头最大, 归尾居中, 归身最小, 即当归不同部位所呈现的颜色值也有差异。以上研究表明当归颜色不同则所含的成分或其比例也会相应有所不同, 证实了当归颜色对药材质量的影响。

1.3 气味-质相关性

芳香药材是指以挥发性物质为主要成分, 有芳香气味的中药材, 芳香药材在感染性疾病、心脑血管疾病、消化系统疾病、骨伤疾病、皮肤疾病等方面具有重要疗效, 气味是芳香药材的重要性状。“辨状论质”之气味最早显现于《神农本草经》^[2], 即有些药材特殊的气味能够体现药材固有的性质, 这种性质与其所含挥发油的种类和含量息息相关, 而挥发油种类和含量又由味道的浓淡、香臭、酸辛等因素决定。当归属于芳香扶正药, 传统的辨识经验是味浓者为佳, 因为味道的浓淡与挥发油的多少相关联。据《本草纲目》^[9]: “以秦归头圆尾多色紫气香肥润者, 最胜他处; 川产尾粗坚枯头大色白, 止宜入发散药尔”, 可知当归药材品质与其气味有着密切的关联性。电子舌 (electronic tongue, ET) 是一种利用多传感阵列检测液体样品的特征响应信号, 用信号模式识别处理和专家系统学习识别等方法来实现样品的定性或定量分析等一类新型分析测试技术设备的研究^[27-29]; 电子鼻是一种新型智能感官仪器, 通过模拟人类的嗅觉系统对被测物质进行品质评价, 多采用气味指纹信息对气体或挥发性成分进行定性或定量检测^[30-31]。电子舌与电子鼻最大的区别在于前者测试对象为液体, 后者为气体, 二者对当归气味和品质的研究都起到了良好的效果。

吴钰等^[32]采用电子舌技术对当归样品中 9 种滋味进行检测, 表明当归味与其质量相关, 阿魏酸含量与鲜味值呈显著正相关, 而与苦味、涩味、甜味、咸味、苦味回味、鲜味回味值无显著相关性。李泽仟等^[33]认为 6-十一酮、丁烯基苯酐、Z-藁本内酯等化合物为当归的气味特征物质基础。Zheng 等^[34]研究显示, 当归中正丁基苯酐、亚丁基苯酐、洋川芎内酯 A 和藁本内酯四种苯酐类化合物与其气味之间存在一定的相关性。刘阿静等^[35]借助于电子鼻技术采集当归药材气味信息, 用高效液相色谱法测定当归中阿魏酸和藁本内酯的含量, 发现传感器 W1S

和 W2W 的响应值与阿魏酸、藁本内酯的含量和挥发油含量呈极显著负相关和显著负相关; 阿魏酸、藁本内酯的含量均与 W5S、W3S 的响应值呈显著负相关, W1C、W3C、W5C 响应值与阿魏酸的含量呈显著正相关, W1C、W3C 响应值与藁本内酯含量呈显著正相关。程亚茹等^[36]采用电子鼻对当归粉末气味进行检测, 结果表明电子鼻传感器响应值与烯烃类和苯酐类成分含量呈正相关, 与颜色深浅呈负相关; 且根据相关性显著程度强弱, 认为烯烃类成分是当归药材的主要气味物质基础。Zhang 等^[37]也认为对当归药材气味特征起主要贡献作用的是香味化合物中的萜烯类和芳香族类化合物。因此当归药材的气味等形状特征与其药效组分相关联, 为当归药材的“优劣”鉴别提供一定参考。

2 当归的品质内涵

明确当归“辨状论质”的深层含义, 科学地评估当归的品质显得尤为关键。《中国药典》2020 年版中当归的质量控制标准仍然只以阿魏酸作为评价的单一指标成分, 而川芎和藁本的标志性成分同样是阿魏酸。且由于中药材的化学成分种类繁多, 仅依赖这一成分作为检测标准, 很难全面、科学和准确地评估当归的整体品质^[38]。当归除补血活血、调经止痛、润肠通便的传统功效以外, 还具有抗炎、抗肿瘤、脑保护、肝保护、心血管系统保护作用和降血糖等多种药效^[39-41]。当归作为一味药食同源的大宗药材, 应以药效作为品质评价的最终依据才能进一步阐明“辨状论质”的科学内涵。研究发现当归药材中藁本内酯和阿魏酸松柏酯的含量与商品等级和电子鼻气味特征有显著正相关, 阿魏酸与抗血小板聚集活性有较高的关联度^[14]; 唐文文^[42]研究得出在促血红蛋白生成、抑制凝血酶和凝血因子能力方面 (即补血活血), 一等、二等当归明显优于三等、四等当归, 且一等当归能力最强, 四等当归能力最弱。以上证明当归外观形态-化学成分-药理作用间存在一定关联, 因此结合多重指标预测中药材的品质可靠性会更高, 有利于对相关研究对象进行全面、具体的评价。

现有的中药评价模式多是以单一或者少数标志性成分为依据, 而以此模式作为质量控制违背了中药多成分、多靶点、多层次的机制^[43], 因此, 很难全面地揭示中药的质量和其标志性成分的专一性, 也难以与中药的药理作用进行关联。基于刘昌孝院士^[44]对质量标志物 (quality marker, Q-Marker)

的定义, 众多学者对当归化学成分的独特性、有效性和成分可测性等之间的相关性进行了深入探讨, 对当归 Q-Marker 进行预测分析。吕成龙等^[39]从化学成分可测性等 4 个方面分析论述了当归的 Q-Marker, 认为应将酚酸类中阿魏酸等以及以 Z-藁本内酯为代表的苯酞类成分作为其 Q-Marker。当归中除了有酚酸和苯酞类组分外, 还含有多糖、黄酮、氨基酸、核苷类、单帖和倍半萜及芳香族化合物等成分, 这些物质有多种药理作用, 包括具有促血红蛋白生成、抑制凝血酶和凝血因子、抗氧化、抗炎镇痛、抗血小板聚集、保护肝脏、抗肿瘤、调节免疫系统, 因此在临床上应用极为广泛^[45]。而这些次生代谢产物成分群发挥药效的机制及化学物质基础尚不明确, 因此, 如何开展以药理作用为导向的当归药效成分的系统溯源是对当归“辨状论质”内涵进行深刻阐释的关键所在。

研究发现, 当归中的欧前胡素可以通过降低哺乳动物雷帕霉素靶蛋白/核糖体 S6 蛋白激酶/真核翻译起始因子-4E 结合蛋白 1 及丝裂原活化蛋白激酶途径活性来阻断缺氧诱导因子-1 α (hypoxia-inducible factor-1 α , HIF-1 α) 在体内合成, 使血管内皮生长因子 (vascular endothelial growth factor, VEGF) 以及促红细胞生成素的 mRNA 和蛋白质的表达能力下降, 继而对人结肠癌细胞 HCT116 细胞株的血管新生产生抑制作用^[46]。刘少平等^[47]通过建立大鼠免疫性结肠炎模型, 发现当归多糖具有良好的抗炎效果, 能够显著降低大鼠机体的炎症因子如白细胞介素-2 (interleukin-2, IL-2)、肿瘤坏死因子- α (tumor necrosis factor- α , TNF- α) 等的水平, 升高超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD) 活性、转化生长因子- β (transforming growth factor- β , TGF- β)、白细胞介素-10 (interleukin-10, IL-10) 等抑炎因子水平。曲强等^[48]成功构建了自发性高血压的大鼠实验模型, 并对当归挥发油在自发性高血压大鼠脂质代谢中的调控作用及其背后的原理进行了深入探讨, 研究表明当归挥发油可能是通过上调脂质代谢基因的表达、抑制动脉粥样硬化等而实现降压效果, 并且影响脂质代谢。Ren 等^[49]研究发现阿魏酸可通过影响 Toll 样受体 4/髓样分化因子 88 信号通路激活, 减少大鼠海马神经元凋亡和氧化应激而显著减轻缺血/再灌注大鼠的记忆损伤; 体外实验表明, 阿魏酸可显著抑制 I/R 诱导的活性氧对 PC-12 细胞的损伤, 其机制可能是通过

剂量依赖性地抑制细胞凋亡、Ca²⁺内流、超氧阴离子、丙二醛和谷胱甘肽过氧化物酶的产生而发挥作用。因此从当归药效出发, 将其 Q-Marker 与药理作用进行系统关联, 构建药物-Q-Marker-活性成分网络, 以此来准确分析当归复杂次生代谢产物群中的药效成分。

3 当归道地性品质成因研究

《中华人民共和国中医药法》第二十三条指出: “道地中药材, 是指经过中医临床长期应用优选出来的, 产在特定地域, 与其他地区所产同种中药材相比, 品质和疗效更好, 且质量稳定, 具有较高知名度的中药材”。道地药材被认为是优质中药材的代名词, 是古代辨别优质中药材品质的综合标准。道地药材的形成是特定的基因型在特定的生境下受到复杂的调控导致某些代谢过程的关键酶基因的表达产生了时空差异的产物^[50]。因而, 道地药材的形成受到遗传物质、产地生态环境要素如气候、土壤等的影响, 同时还受到产地特殊加工与炮制处理等人为因素的影响。所以, 当归的遗传特性、环境因子、生长采收期、药用部位、产地加工、炮制等都是其道地性品质形成的重要影响因素。

3.1 遗传特性与当归道地性品质

优良的种质资源是道地性药材品质的基础, 而道地药材的种质资源就是优质的遗传资源, 主要包括栽培品种或类型、野生种、近缘野生种和选育的良种等。由于栽培历史悠久, 当归品种单一、种质退化、抗性降低的现象严重, 因而通过育种改变当归的种质培育新品种是重要途径。目前, 当归有“紫茎当归”和“绿茎当归”2 个农家栽培品种, 岷归 1、2、5 号, 90-03, 2000-01 是经过系统选育的品种, 而岷归 3、4、6 号是通过诱变育种方法选育的品种, 其中岷归 6 号 (DGA2000-01) 提高了当归抗性、产量等特性^[51]。此外, 航空育种也取得了一定进展, 其中包括当归化学成分的改变, 例如阿魏酸含量提高, 而醇溶性浸出物含量降低^[52]。

除种质资源外, 中药材次生代谢产物合成和积累也受到其自身遗传特性的影响。通过解析当归活性成分的生物合成途径和挖掘关键酶基因, 调控活性成分生物合成中的功能基因是提高当归品质的重要途径。目前当归中活性成分的生物合成途径及调控机制等方面均有研究报道, 其中对当归中阿魏酸生物合成途径的研究已经比较清楚。阿魏酸是当归的主要次生代谢产物, 也是当归的主要药效成

分,其主要生物合成途径之一为咖啡酸甲基转移酶途径,该反应的合成途径历程如图 1 所示^[53]。其中,咖啡酸-O-甲基转移酶 (caffeic acid-3-O-methyltransferase, COMT) 是一种关键的甲基化酶,该酶具有催化咖啡酸转化为阿魏酸的能力,且 COMT 的基因表达以及酶活性的改变都会对黄酮类、苯酚类、香豆素类、木脂素类和有机酸类的代

谢产物造成影响^[54]。因此,咖啡酸-O-甲基转移酶可能在当归的生长发育及合成阿魏酸方面起到了至关重要的作用。此外,在苯丙烷的代谢途径中,4-香豆酸辅酶 A 连接酶 (4-coumarate coenzyme A ligase, 4CL) 作为众多酶系中的核心酶之一,位于特定的苯丙烷类衍生物合成的关键时刻,可催化阿魏酸向相应的硫酯转化^[55-56]。

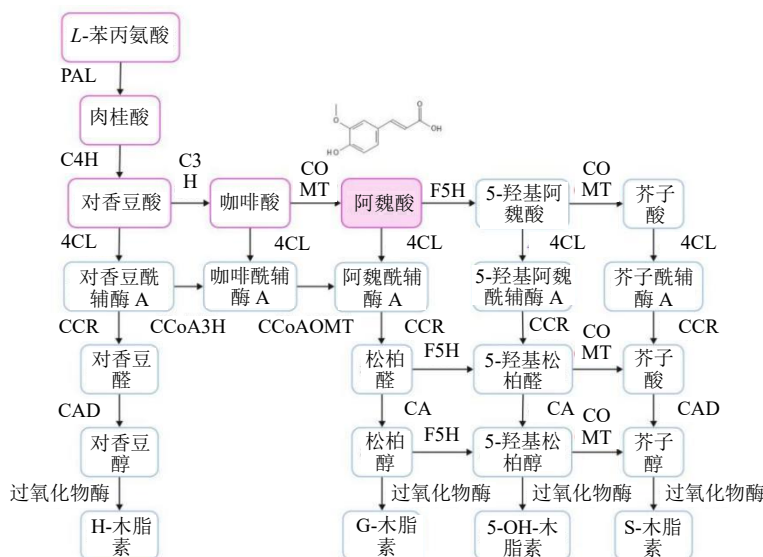


图 1 阿魏酸合成途径图

Fig. 1 Ferulic acid synthesis pathway diagram

除阿魏酸合成途径以外,当归多糖的代谢机制也很复杂,其中甘油醛-3-磷酸脱氢酶是当归多糖生物合成中的关键酶,在生物进化系统上保守性很强,且在不同个体、不同发育时期和组织细胞内的表达稳定性都很强,因此该酶经常作为基因表达量研究中的内参照基因^[57]。有研究指出,“岷归 1 号”(M1)和“岷归 2 号”(M2)这 2 个当归品种在表型上的差异主要是由类黄酮成分的代谢差异引起,该物质与植物的抗逆性有着紧密的联系^[58];进一步通过对两个品种当归转录组测序差异比较分析,发现其抗旱途径如脱落酸调节、渗透调节、活性氧清除和其他功能蛋白质调节具有差异性。通过分析干旱胁迫下的 M1 和 M2 中 AP2/ERF 基因的表达模式,发现有 6 个基因在 M2 的 D2 时期表达量均明显上调,将这些基因作为研究 2 个品种当归响应干旱胁迫分子机制的候选基因,为进一步探索当归抗旱调控机制及培育抗逆能力更强的当归品种提供数据支持和理论参考^[59]。高文远等^[60]利用随机扩增

多态性 DNA (randomly-amplified polymorphism DNA, RAPD) 技术对来自不同产地的 18 个当归样品在不同地理群体间的遗传分化现象进行研究发现,当归的地理分布距离越小,其遗传上的差异就越小;相反越大,这为当归的药材道地性研究提供了分子水平的支持依据。

3.2 环境因子与当归道地性品质

道地药材的产生不仅与该道地药材产区在种群遗传上的特殊性有关,还与产区生态环境息息相关。生态环境因子如光照、温度、湿度、土壤等在药材道地性品质形成中发挥重要作用,徐小琼等^[61]认为当归适宜生长在海拔 1 800~3 000 m,土壤 pH 值在 6.5~8.0,水分条件适中的地区,譬如甘肃省东南部种植的当归品质较好。杨芙蓉^[62]研究发现,当归中藁本内酯、丁烯基苯酐与年度、季度气温有一定相关性;绿原酸、阿魏酸与降水量呈显著正相关;阿魏酸、绿原酸、藁本内酯和丁烯基苯酐与太阳辐射量呈显著相关性;土壤中有效铁与藁本内酯

呈显著负相关,全铬、全镍与阿魏酸含量呈极显著正相关。董涵^[63]实验证明,当归活性物质的积累与海拔高度、光照强度、降雨量存在显著的正相关关系,与温度呈现负相关。杜彩艳等^[64]发现当归在种植过程中施用生物有机肥可增加土壤养分,从而提高当归中总多糖、阿魏酸和挥发油的含量,有效改善当归药材品质。张迎芳^[65]研究得出施用缓释氮肥可提高当归中阿魏酸、藁本内酯、阿魏酸松柏酯等的含量,有利于促进当归的生长发育;此外,施加钼、锰微肥能提高当归中挥发油、多糖、阿魏酸的含量。席少阳等^[66]认为当归中酚酸类成分阿魏酸与绿原酸的合成积累,受到降水量、海拔、土壤酸碱度、气温、土壤有机碳含量等多种生态因子的综合影响,且不同环境因子的影响程度有一定差异。当归在漫长的历史中进行了选择,主要保留了甘肃和云南 2 个主产地即道地产区,说明甘肃和云南的环境因子是造就当归品质形成的重要因素,甘肃当归中以岷归品质最佳,而云当归目前栽种于丽江、鹤庆、中甸、宁蒗、维西、禄劝、沾益、昭通等多地,但云南最佳产地者目前不明。

3.3 生长、采收期与当归道地性品质

中药材道地产区的气候特点与其生长、采收期息息相关,因此生长、采收期也间接影响着药材的道地性品质。当归的生长期可分为 3 个阶段,第 1 年为育苗期,第 2 年为成药期,第 3 年为留种期,其中成药期是当归生长过程中的主要物候期^[67]。当归不同生长时期正丁烯基苯酞和 Z-藁本内酯的平均含量与生长周期关系密切^[68]。杨应文等^[69]发现在第一年时当归中阿魏酸、藁本内酯和总多糖的含量变化相对稳定,但在第 2 年和第 3 年开始变得活跃,且在当归的 3 年生长周期中,当归多糖的含量变化显著高于另外 2 种活性成分,是参与代谢活动中最重要的有效成分。

历代本草记载当归多于阴历 2、8 月(阳历 3、9 月)采根阴干,现代采收时期与古代基本相符,为秋末采挖。当归传统的采收期一般为第二年的 10 月中上旬。Chen 等^[70]研究发现当归药材尾部化合物含量 10 月最多,体内的藁本内酯含量也在 10 月最高;归头中亚丁基苯酞的相对含量在 10 月份最高,而洋川芎内酯 A 和丁基苯酞在头部的相对含量下降,在体部和尾部的含量增加,表明积累在头部的化合物可能在生长后期转移到体部和尾部。总体而言,化合物的积累和分布与当归不同药用部位的药

效一致,化合物种类和含量的积累在 10 月份达到最大值,与传统的采收期一致。萨日娜等^[71]研究表明当归在生长发育过程中,藁本内酯和大多数其他成分的相对含量逐渐上升,且在当归成熟时期其相对含量达到最大值,但是并非全部成分按此规律变化,而根据指标性成分藁本内酯的含量和大多数成分含量的变化趋势可以看出 10、11 月份采集药材质量较好。葛月兰等^[72]也对来自不同产地和不同采收时间的当归主要活性部分挥发性成分进行了动态积累的分析评估,结果显示,当归药材采收最佳时间是在秋末冬初(10 月份)。而韦美丽等^[73]通过对不同采收期的当归药材块根产量以及其阿魏酸和挥发油含量的测定,比较不同采收时期的当归药材产量、质量差异,从而确定 12 月份是云南当归药材的适宜采收期。因此在生产实际中,要结合道地产区的种植气候条件并考虑当归次生代谢产物的含量和当归入药部位产量等因素,本着药材品质最佳和种植效益最大的原则来制定本地产区适宜采收期。

3.4 药用部位与当归道地性品质

古代医家认为不同部位当归的药理学作用也不同,全当归根略成圆柱形,可分全归、归头、归身和归尾 4 个部分。明代的《本草通玄》^[74]云:“头止血而上行,梢破血而下行,身养血而守中,全活血而不定”。苏丙贺^[75]研究表明,当归中化学成分含量高低与当归药用部位有一定的关系,譬如归头中总鞣质和挥发油含量最高,归尾中阿魏酸含量最高。黄荣^[76]发现当归的不同药用部位中阿魏酸的质量分数在 0.026%~0.132%,藁本内酯的质量分数在 0.21%~0.78%,两者之间存在明显差异。并且,不同部位的阿魏酸的含量从多到少依次为当归尾、当归身以及当归头,藁本内酯的含量从多到少依次为当归身、当归头以及当归尾。Li 等^[77]研究发现,11 个差异标记物在当归不同部位间存在一定的差异,尤其是 Z-藁本内酯、阿魏酸松柏酯、Mg、Zn 差异显著。萨日娜等^[78]以气相色谱-质谱联用技术测定当归根、茎、叶及种子的挥发油成分,发现在当归根、茎、叶及种子中差异较大的成分有 Z-藁本内酯、E-藁本内酯、正丁烯基苯酞、亚油酸、2-甲氧基-4-乙烯基苯酚、邻苯二甲酸二正辛酯等。另有研究采用气质联用对不同部位当归挥发油成分及含量进行分析,发现当归根、茎、叶中化合物数量分别为 26、57 和 51 个。其中,根、茎、叶 3 个部位共有

成分仅有 9 个, 而茎、叶 2 个部位的共有成分高达 31 个^[79]。杨应文等^[80]利用高效液相对当归药材各部位检测, 认为当归根部阿魏酸、藁本内酯、丁烯基苯酚 3 种活性成分的含量积累较多, 而在种子中含量最低, 同时显示, 藁本内酯的含量总体高于其他 2 种成分。Chen 等^[70]首次运用气相色谱质谱联用技术来分析当归在不同时间段和不同药用部位的化学组成, 结果显示各个部位的化合物的相对含量存在差异, 获得当归各药用部位化学成分累积规律的差异性, 从而为阐明当归各药用部位化学组成差异性的成因提供理论依据。

3.5 产地加工与当归道地性品质

规范的生产加工是道地药材形成的技术保障, 我国人民在道地药材的生产实践中, 发现产地加工作为中药材生产的一个环节, 也是药材形成道地性的因素之一。当归产地加工干燥方法主要有阴干、晒干、烟熏干燥、烘干、微波干燥及远红外干燥等。靳子明等^[81]通过对熏炕法、晒干法和硫磺熏干法 3 种不同产地加工方法加工的岷当归的指标性成分阿魏酸含量及重金属含量测定数据进行对比分析, 结果表明熏炕法加工的岷当归品质较好。王耀鹏^[82]对比不同干燥方法认为阴干的当归评分结果最好, 其次是烟熏干燥的当归, 并且发现晒干当归在晒干时受到温度、光照强度的不同, 导致挥发油的散失和阿魏酸结构的变化; 而阴干的方法温度低、光照强度较弱, 因此阿魏酸的含量保持良好。藁本内酯在当归样品中的含量可能会因为干燥过程中药材受到的温度、光照强度和光照时间的影响而发生多种异构化反应, 从而导致其含量发生变化^[83]。段素敏等^[84]研究发现热风干燥法可以保留当归的主要成分但干燥效率较低, 而微波干燥法干燥效率较高且可以最大限度保留挥发性成分的含量, 因此认为结合热风 and 微波两种技术, 可以较好研究快速干燥当归药材的可行性。

近年来, 中药材产地加工中的趁鲜加工受到业界的广泛关注, 中药材趁鲜加工是指在产地用新鲜中药材进行切制等加工, 制成中药饮片。随着中药材趁鲜加工的发展, 甘肃省发布第一批中药材产地加工(趁鲜加工)品种目录, 其中当归的趁鲜加工方法为“秋末采挖, 待水分稍蒸发后, 除去须根和泥沙, 清洗, 趁鲜低温干燥, 闷润, 切薄片或厚片, 低温干燥”。与传统产地加工相比, 趁鲜加工不只是缩短了加工时间, 更重要的是它可以减少人为因素

带来的误差, 从而保障饮片的品质, 但却鲜有对当归趁鲜加工的研究报道。仅有的研究发现, 趁鲜加工的当归饮片中总多糖、浸出物、挥发油和阿魏酸含量均高于传统加工饮片, 当归趁鲜加工饮片质量优于传统方法饮片, 其中总多糖、浸出物、挥发油和阿魏酸含量均高于传统加工饮片^[85-86]。甘肃作为当归的道地产区, 其趁鲜加工的独特产地加工技术保证了当归道地药材与非道地药材的品质差异, 形成了自己的道地性优势。

综上, 当归产地加工方法导致外观性状与阿魏酸、藁本内酯等指标性成分受到影响, 故当归在产地加工过程中需结合外观性状, 同时利用现代的分析技术综合考虑不同产地加工方法对当归道地性品质的影响。

3.6 炮制与当归道地性品质

古人早就认识到了道地产区的独特加工炮制技术对道地药材形成道地性的重要作用, 当归最早于南北朝就有“酒浸”的制法^[87]。近年来除《中国药典》2020 年版^[1]收录生当归和酒当归 2 种炮制品外, 各地方炮制规范收载其特殊炮制品, 譬如 1963 版《昆明中药咀片规范》^[88]中的米炒、醋炒当归, 《上海市中药饮片炮制规范》2008 年版^[89]的酒洗当归, 《河南省中药饮片炮制规范》2005 年版^[90]的蜜当归和《甘肃省中药炮制规范》2009 年版^[91]的油当归。有研究表明, 当归经酒炙后多糖含量较生品升高, 挥发油类成分如藁本内酯含量降低, 部分微量元素含量会有所上升^[92]。Zhang 等^[93]研究发现, 与生当归相比酒当归在颜色、香气、成分和抗氧化能力方面都发生了显著的变化, 不同的加工方法也导致了酒洗当归和酒炒当归之间的显著差异。陶益等^[94]研究发现, 与生品相比土炒当归中挥发油性成分的含量减少, 且(Z)-藁本内酯、新当归内酯及欧当归内酯 A 等的含量在各种炮制品中降低幅度最显著, 约为 40%~50%。药理研究表明, 当归制炭后较生品相比收敛止血作用增强, 是因为制炭后鞣质成分的含量升高为生品的 2 倍左右, 而鞣质具有收敛止血的作用^[95]。张景珍等^[96]以酒当归炒制的温度和时间、黄酒用量和闷润时间为考察因素, 阿魏酸、总多糖、浸出物含量和体外抗凝血时间为考察指标设计正交实验, 通过综合评分法筛选出酒当归的最佳炮制工艺是当归饮片与黄酒 10:1, 闷润 1 h, 140 ℃炒制 15 min。杨柳等^[97]以外观性状、阿魏酸及挥发油含量为响应值, 在单因素实验基础上, 使

用 Box-Behnken 响应面法设计并优化土炒当归炮制工艺参数: 灶心土用量为饮片量的 0.30 倍, 炒制温度 140.16 °C, 炒制时间 9.44 min。Zhong 等^[98]采用角叉菜胶致大鼠急性炎症模型研究炒当归、油当归和土当归的抗炎效果, 发现炒当归的抗炎效果比其他炮制品更好。纪鹏等^[99]采用气相色谱质谱联用技术对当归炭的化学组分进行分析, 结果发现当归炭中几乎不含有辛醛、6-丁基-1, 4 环庚二烯、1S- α -蒎烯及 2-甲氧基-苯酚这几种成分, 却新增了 2 种未知化合物。

综上, 当归在经过炮制后, 其颜色、香味等特性都会发生改变, 同时经过炮制的土炒当归和酒当归的挥发性物质含量都有所下降。因此, 可结合“辨状论质”的理念, 将当归炮制品的外部特性与其指标性成分的含量联系起来, 进而对其炮制品的质量进行评估。

4 结语与展望

当归“辨状论质”的相关研究表明, 当归商品等级、根重、根长、归头长、侧根数、归头直径及淀粉粒常数等形态特征, 与浸出物、多糖、阿魏酸等含量呈相关性; 当归颜色不同则所含的成分或其比例也会相应有所不同, 证实了当归颜色与药材品质的也呈现相关性; 当归药材的气味特征与其挥发油、苯酐类和烯烃类药效组分相关联, 为当归药材的“优劣”鉴别提供一定参考。此外, 当归的遗传特性、不同药用部位、产地加工、炮制方法、生长采收期等都会影响当归外观性状及化学成分含量。其中, 当归不同部位即全归、归头、归身和归尾与其次生代谢产物含量具有相关性, 从而导致药理学作用也不同; 当归不同产地初加工方法导致外观性状与阿魏酸、藁本内酯等指标性成分受到影响; 当归在经过炮制后, 其颜色、香味等特性都会发生改变, 同时经过炮制的土炒当归和酒当归的挥发性物质含量都有所下降。因此, 建议后续当归的研究应基于“辨状论质”的理念, 将当归的外部特性与其指标性成分的含量联系起来, 同时利用现代的分析技术综合分析, 进而全面准确地评价当归的品质。

近年来关于当归“辨状论质”内涵的研究逐步走向科学化和系统化, 目前已有大量研究依据该理论在当归的品质评价方面进行了一系列探索。当归品质评价的指标性成分受到遗传特性、药用部位、采收加工等众多因素的影响, 因此深入研究这些关键影响因素, 有助于揭示其品质成因, 进而为当归

的质量控制与品质评价提供坚实的基础。目前, 当归作为大宗药材, 其某些核心成分如阿魏酸的生物合成途径已被全面解析, 但仍有更多与其药效紧密相关的活性成分的合成路径等待进一步的探索; 关于当归各成分在不同生长阶段、产地处理以及炮制方法等方面的作用机制, 仍需要系统科学研究。因此, 中药的质量评价应以药效为最终依据, 内化为有效成分的含量, 并充分运用电子感官仪器、液质联用和生物药效评价等技术, 构建当归药材“性状-成分-药效”关联分析模型, 旨在进一步阐明“辨状论质”的科学内涵, 为阐明当归的品质成因提供理论依据。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 中国药典 [S]. 一部. 2020: 139.
- [2] 清·孙星衍, 孙冯翼辑. 神农本草经 [M]. 太原: 山西科学技术出版社, 2018: 84.
- [3] 关于当归等 6 种新增按照传统既是食品又是中药材的物质公告(2019 年第 8 号)[EB/OL]. (2020-08-21)[2023-11-27]. <http://www.nhc.gov.cn/sps/s7885/202001/b941b-6138e93414cb08aed926ca3c631.shtml>
- [4] Liu X, Song Y F, Zhou F R, et al. Network and experimental pharmacology on mechanism of Si-Wu-Tang improving ovarian function in a mouse model of premature ovarian failure induced by cyclophosphamide [J]. *J Ethnopharmacol*, 2023, 301: 115842.
- [5] Xia W W, Hu S S, Wang M M, et al. Exploration of the potential mechanism of the Tao Hong Si Wu Decoction for the treatment of postpartum blood stasis based on network pharmacology and *in vivo* experimental verification [J]. *J Ethnopharmacol*, 2021, 268: 113641.
- [6] Sun L L, Yang Z G, Zhao W, et al. Integrated lipidomics, transcriptomics and network pharmacology analysis to reveal the mechanisms of Danggui Buxue Decoction in the treatment of diabetic nephropathy in type 2 diabetes mellitus [J]. *J Ethnopharmacol*, 2022, 283: 114699.
- [7] Huang H, Xie Y F, Li X F, et al. Danggui Buxue Decoction regulates the immune function and intestinal microbiota of cyclophosphamide induced immunosuppressed mice [J]. *Front Pharmacol*, 2024, 15: 1420411.
- [8] 宋·苏颂编撰. 尚志钧辑校. 本草图经 [M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1994: 151.
- [9] 明·李时珍著. 马美著校点. 本草纲目 [M]. 第 2 版. 武汉: 崇文书局, 2020: 55.
- [10] 李佳园, 魏晓嘉, 万国慧, 等. “辨状论质”的历史沿革与现代研究进展 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2021,

- 27(6): 189-196.
- [11] 颜正华等点校. 本草衍义 [M]. 北京: 人民卫生出版社, 1990: 57.
- [12] di Pietrantonio F, Benetti M, Cannatà D, *et al.* A surface acoustic wave bio-electronic nose for detection of volatile odorant molecules [J]. *Biosens Bioelectron*, 2015, 67: 516-523.
- [13] Zhuang L J, Guo T T, Cao D X, *et al.* Detection and classification of natural odors with an *in vivo* bioelectronic nose [J]. *Biosens Bioelectron*, 2015, 67: 694-699.
- [14] 李小阳. 基于“感官-化学-生物”指标的当归综合质量评价研究 [D]. 北京: 北京中医药大学, 2019.
- [15] Wang Z H, Wang D M, Huang L F. Analysis of the correlation between commodity grade and quality of *Angelica sinensis* by determination of active compounds using ultraperformance liquid chromatography coupled with chemometrics [J]. *Evid Based Complement Alternat Med*, 2014, 2014: 143286.
- [16] Ouyang X M, He Y M, Zhu J R, *et al.* Primary study on the ferulic acid contents in different commercial grades of Gansu *Angelica* [J]. *Chin Pharm Affairs*, 2005, 19(7): 4423-4426.
- [17] 南朝·梁陶弘景编. 尚志钧尚元胜辑校. 本草经集注: 辑校本 [M]. 北京: 人民卫生出版社, 1994: 58-72.
- [18] 刘香南, 张明童, 赵建邦, 等. 甘肃栽培当归性状个体差异与质量的相关性研究 [J]. *中药材*, 2013, 36(6): 871-874.
- [19] 杨博文. “当归类”药材的等级质量和品种鉴定研究 [D]. 成都: 成都中医药大学, 2017.
- [20] 清·陈嘉谟撰. 王淑民等点校. 本草蒙筌 [M]. 北京: 人民卫生出版社, 1988: 36.
- [21] 徐曼菲, 吴志生, 刘晓娜, 等. 从辨色论质谈中药质量评价方法 [J]. *中国中药杂志*, 2016, 41(2): 177-181.
- [22] 任伟光, 李文涛, 黄林芳. 当归颜色与其道地性分析 [J]. *中国医院药学杂志*, 2015, 35(10): 890-894.
- [23] Sun M, Yan D H, Yang X L, *et al.* Quality assessment of crude and processed *Arecae Semen* based on colorimeter and HPLC combined with chemometrics methods [J]. *J Sep Sci*, 2017, 40(10): 2151-2160.
- [24] Li J Q, Tang M, Zhong Y Q, *et al.* A novel strategy for the quality control of carbonized Typhae pollen using colorimeter, liquid chromatography-mass spectrometry, and efficacy evaluation coupled with multivariate statistical analysis [J]. *Biomed Chromatogr*, 2024, 38(6): e5856.
- [25] 高慧, 王新杰, 张瑶, 等. 基于表里量化关联的酒当归有效成分与表观颜色相关性研究 [J]. *中国中医药信息杂志*, 2020, 27(11): 71-75.
- [26] 洪婉敏, 方朝纘, 纪玉华, 等. 当归不同药用部位炒焦过程中颜色与化学成分的变化规律研究 [J]. *中药材*, 2022, 45(3): 586-593.
- [27] Jiang H Y, Zhang M, Bhandari B, *et al.* Application of electronic tongue for fresh foods quality evaluation: A review [J]. *Food Rev Int*, 2018, 34(8): 746-769.
- [28] Guedes M D V, Marques M S, Guedes P C, *et al.* The use of electronic tongue and sensory panel on taste evaluation of pediatric medicines: A systematic review [J]. *Pharm Dev Technol*, 2021, 26(2): 119-137.
- [29] Miao X S, Cui Q Y, Wu H H, *et al.* New sensor technologies in quality evaluation of Chinese materia medica: 2010-2015 [J]. *Acta Pharm Sin B*, 2017, 7(2): 137-145.
- [30] Mota I, Teixeira-Santos R, Cavaleiro Rufo J. Detection and identification of fungal species by electronic nose technology: A systematic review [J]. *Fungal Biol Rev*, 2021, 37: 59-70.
- [31] Jia W S, Liang G, Jiang Z J, *et al.* Advances in electronic nose development for application to agricultural products [J]. *Food Anal Meth*, 2019, 12(10): 2226-2240.
- [32] 吴钰, 饶智, 陈彦坤, 等. 基于仿生技术对不同产地当归阿魏酸含量与滋味的关联性研究 [J]. *中国食物与营养*, 2022, 28(2): 37-43.
- [33] 李泽仟, 顾欢, 康乐, 等. 当归中关键气味活性化合物的鉴定及其在煎煮过程中变化规律研究 [J]. *食品工业科技*, 2016, 37(9): 311-316.
- [34] Zheng S H, Ren W G, Huang L F. Geoherbalism evaluation of *Radix Angelica sinensis* based on electronic nose [J]. *J Pharm Biomed Anal*, 2015, 105: 101-106.
- [35] 刘阿静, 王娟, 王新潮, 等. 基于电子鼻技术对当归整体气味与其主要化学成分相关性的分析研究 [J]. *质量安全与检验检测*, 2022, 32(2): 5-8.
- [36] 程亚茹, 石秀佳, 龚焱婷, 等. 基于形性与化学指标关联分析的当归挥发油质量评价和当归产地鉴别 [J]. *中国现代中药*, 2022, 24(4): 629-637.
- [37] Zhang J H, Cheng M, Xue Y B, *et al.* Volatile flavour identification and odour complexity of radix *Angelicae sinensis* by electronic nose, integrated gas chromatography-mass spectrometry/olfactometry and comprehensive two-dimensional gas chromatography-time-of-flight-mass spectrometry [J]. *Phytochem Anal*, 2023, 34(3): 329-346.
- [38] 刘妍如, 唐志书, 宋忠兴, 等. 以药效成分群-活性-功效关联作用筛选当归质量标志物 [J]. *中草药*, 2021, 52(9): 2626-2637.
- [39] 李晓雨, 李双凤, 刘晓美, 等. 当归-川芎药对的化学成分、药理作用及临床应用研究进展 [J]. *中草药*,

- 2024, 55(4): 1415-1426.
- [40] Chen L L, Fan B, Wang F Z, *et al.* Research progress in pharmacological effects and mechanisms of *Angelica sinensis* against cardiovascular and cerebrovascular diseases [J]. *Molecules*, 2024, 29(9): 2100.
- [41] Shen J, Qin H, Li K K, *et al.* The angelica Polysaccharide: A review of phytochemistry, pharmacology and beneficial effects on systemic diseases [J]. *Int Immunopharmacol*, 2024, 133: 112025.
- [42] 唐文文. 多指标成分与生物活性相结合的当归品质综合评价 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2023.
- [43] 肖小河, 李寒冰, 赵旭, 等. 新形势下的中药大质量观及实践 [J]. *中草药*, 2025, 56(1): 1-8.
- [44] 刘昌孝, 陈士林, 肖小河, 等. 中药质量标志物(Q-Marker): 中药产品质量控制的新概念 [J]. *中草药*, 2016, 47(9): 1443-1457.
- [45] Wei W L, Zeng R, Gu C M, *et al.* *Angelica sinensis* in China-a review of botanical profile, ethnopharmacology, phytochemistry and chemical analysis [J]. *J Ethnopharmacol*, 2016, 190: 116-141.
- [46] Mi C L, Ma J, Wang K S, *et al.* Imperatorin suppresses proliferation and angiogenesis of human colon cancer cell by targeting HIF-1 α via the mTOR/p70S6K/4E-BP1 and MAPK pathways [J]. *J Ethnopharmacol*, 2017, 203: 27-38.
- [47] 刘少平, 董卫国, 吴东方, 等. 当归多糖对免疫性结肠炎大鼠结肠损伤的保护作用研究 [J]. *中国药理学通报*, 2003, 19(6): 693-696.
- [48] 曲强, 纪禄凤, 伊琳. 当归挥发油对自发性高血压大鼠脂质代谢相关基因 Tnfaip8l2、Ahsg 表达的影响 [J]. *中国老年学杂志*, 2019, 39(11): 2709.
- [49] Ren Z K, Zhang R P, Li Y Y, *et al.* Ferulic acid exerts neuroprotective effects against cerebral ischemia/reperfusion-induced injury via antioxidant and anti-apoptotic mechanisms *in vitro* and *in vivo* [J]. *Int J Mol Med*, 2017, 40(5): 1444-1456.
- [50] 黄璐琦, 郭兰萍, 胡娟, 等. 道地药材形成的分子机制及其遗传基础 [J]. *中国中药杂志*, 2008, 33(20): 2303-2308.
- [51] 张明惠, 朱田田, 晋玲, 等. 基于 HPLC 多指标成分测定及指纹图谱多模式识别的不同产地不同品种当归质量差异分析 [J]. *中草药*, 2022, 53(19): 6187-6199.
- [52] 李瑞霞, 郭凤霞, 陈垣, 等. 当归种子航天诱变二代(SP2)性状研究 [J]. *核农学报*, 2024, 38(10): 1906-1912.
- [53] Yang Y H, Song H W, Lai J Y, *et al.* A *Rehmannia glutinosa* caffeic acid O-methyltransferase functional identification: Reconstitution of the ferulic acid biosynthetic pathway in *Saccharomyces cerevisiae* using *Rehmannia glutinosa* enzymes [J]. *Biotechnol J*, 2023, 18(11): e2300064.
- [54] 李波, 倪志勇, 王娟, 等. 木脂素生物合成关键酶咖啡酸-O-甲基转移酶基因(COMT)的研究进展 [J]. *分子植物育种*, 2010, 8(1): 117-124.
- [55] Gao P H, Qi Y, Li L F, *et al.* *Amorphophallus muelleri* activates ferulic acid and phenylpropane biosynthesis pathways to defend against *Fusarium solani* infection [J]. *Front Plant Sci*, 2023, 14: 1207970.
- [56] Gulick A M, Lu X F, Dunaway-Mariano D. Crystal structure of 4-chlorobenzoate: CoA ligase/synthetase in the unliganded and aryl substrate-bound states [J]. *Biochemistry*, 2004, 43(27): 8670-8679.
- [57] 薛蓓, 张培, 李志辉, 等. 脊尾白虾 GAPDH 基因的克隆及其内参基因稳定性分析 [J]. *中国水产科学*, 2017, 24(5): 1003-1012.
- [58] 曾勇, 刘慧敏. 黄酮类化合物介导的植物耐逆性分析 [J/OL]. *分子植物育种* (2023-08-21) [2023-11-27]. <https://www.x-mol.com/paper/1653792269526642688/t?adv>.
- [59] Zhu T T, Zhang M H, Su H Y, *et al.* Integrated metabolomic and transcriptomic analysis reveals differential mechanism of flavonoid biosynthesis in two cultivars of *Angelica sinensis* [J]. *Molecules*, 2022, 27(1): 306.
- [60] 高文远, 秦恩强, 肖小河, 等. 当归药材道地性的 RAPD 分析 [J]. *中草药*, 2001, 32(10): 926-929.
- [61] 徐小琼, 张小波, 陈娟, 等. 甘肃产当归生态适宜性研究 [J]. *中草药*, 2020, 51(12): 3304-3307.
- [62] 杨芙蓉. 当归品质空间变异的生态驱动因子研究 [D]. 北京: 中国医学科学院, 2021.
- [63] 董涵. 低温调控当归生长及主效活性物质生物合成的机制研究 [D]. 兰州: 甘肃中医药大学, 2022.
- [64] 杜彩艳, 蜂述先, 杨鹏, 等. 施用生物有机肥对云当归产量、品质及土壤养分的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2024(1): 149-156.
- [65] 张迎芳. 缓释协同减氮对当归生长生理与产量质量的影响 [D]. 张掖: 甘肃农业大学, 2023.
- [66] 席少阳, 曹后康, 郭延秀, 等. 地理空间视角下的甘肃道地药材当归酚酸类成分总含量分异特征及驱动因子定量分析 [J]. *中国中药杂志*, 2021, 46(22): 5781-5791.
- [67] 刘天乐, 朱田田, 张明惠, 等. 当归活性成分生物合成与调控研究进展 [J]. *中草药*, 2023, 54(22): 7545-7553.
- [68] 萨日娜, 朱书强, 潘新波, 等. 不同生长期当归挥发油中 Z-藁本内酯和正丁烯基苯酚含量的动态变化研究 [A] // 中国化学会第 28 届学术年会第 9 分会场摘要集 [C]. 北京: 中国化学会, 2012: 1.
- [69] 杨应文, 王亚丽, 萨日娜, 等. 不同生长期当归 ^1H NMR 指纹图谱的研究 [J]. *波谱学杂志*, 2013, 30(1):

- 69-79.
- [70] Chen Y Y, Li Q, Qiu D Y. The dynamic accumulation rules of chemical components in different medicinal parts of *Angelica sinensis* by GC-MS [J]. *Molecules*, 2022, 27(14): 4617.
- [71] 萨日娜, 王亚丽, 倪吉鹏. 不同采收期当归的色谱分析 [A] // 甘肃省化学会第二十七届年会暨第九届甘肃省中学化学教学经验交流会论文摘要集 [C]. 兰州: 甘肃省化学会, 2011: 2.
- [72] 葛月兰, 钱大玮, 段金殿, 等. 不同产地不同采收期当归挥发性成分动态积累规律与适宜采收期分析 [J]. *药物分析杂志*, 2009, 29(4): 517-523.
- [73] 韦美丽, 黄天卫, 孙玉琴, 等. 当归适宜采收期研究 [J]. *特产研究*, 2015, 37(1): 29-31.
- [74] 明·李中梓著. 付先军. 本草通玄 [M]. 北京: 中国中医药出版社, 2015: 17.
- [75] 苏丙贺. 当归中不同部位有效化学成分分析 [J]. *中国药物经济学*, 2019, 14(1): 34-37.
- [76] 黄荣. 当归不同药用部位活性成分含量的分析研究 [J]. *内蒙古中医药*, 2017, 36(18): 117-118.
- [77] Li X, Yao Y X, Wang X X, *et al.* Quantification analysis of 13 organic components and 8 inorganic elements in *Angelica Sinensis* radix and its different parts combined with chemical recognition pattern [J]. *J Anal Methods Chem*, 2020, 2020: 8836184.
- [78] 萨日娜, 潘新波, 杨应文, 等. 当归不同生长部位挥发油的 GC-MS 指纹图谱研究 [A] // 海峡两岸暨 CSNR 全国第十届中药及天然药物资源学术研讨会论文集 [C]. 兰州: 中国自然资源学会天然药物资源专业委员会, 2012: 5.
- [79] 刘洁丽, 邓淑芳, 孙宇靖, 等. 基于 GC-MS 方法比较当归不同生长部位挥发油的化学成分 [J]. *化学世界*, 2020, 61(6): 426-432.
- [80] 杨应文, 王亚丽, 潘新波, 等. 当归不同生长部位 HPLC 指纹图谱的研究 [A] // 西北地区第七届色谱学术报告会甘肃省第十二届色谱年会论文集 [C]. 兰州: 甘肃省化学会色谱委员会, 2012: 2.
- [81] 靳子明, 窦霞, 史巧霞, 等. 不同初加工方法对岷当归质量的影响 [J]. *甘肃中医药大学学报*, 2016, 33(4): 36-40.
- [82] 王耀鹏. 不同初加工和贮藏方法对当归质量的影响研究 [D]. 兰州: 甘肃中医药大学, 2017.
- [83] 房鑫, 熊智, 林晓, 等. 藁本内酯的稳定性及其主要转化产物研究(英文) [J]. *天然产物研究与开发*, 2014(9).
- [84] 段素敏, 孔铭, 李秀杨, 等. 当归药材热风-微波联合干燥方法研究 [J]. *中草药*, 2016, 47(19): 3415-3419.
- [85] 徐天才, 杨光荣, 陈翠, 等. 正交试验优化当归趁鲜切片的加工工艺 [J]. *云南中医药大学学报*, 2024, 47(4): 47-53.
- [86] 张静, 杨平荣, 王燕萍, 等. 当归产地加工与饮片炮制一体化工艺研究 [J]. *兰州大学学报: 医学版*, 2019, 45(3): 13-20.
- [87] 翁倩倩, 赵佳琛, 金艳, 等. 经典名方中当归的本草考证 [J]. *中国现代中药*, 2021, 23(2): 218-227.
- [88] 昆明中药饮片规范 [S]. 1963: 263.
- [89] 上海市中药饮片炮制规范 [S]. 2008: 38.
- [90] 河南省中药饮片炮制规范 [S]. 2005: 55-57.
- [91] 甘肃省中药炮制规范 [S]. 1980: 47-48.
- [92] Chen P X, Dupuis J H, Marcone M F, *et al.* Physicochemical properties and *in vitro* digestibility of cooked regular and nondarkening cranberry beans (*Phaseolus vulgaris* L.) and their effects on bioaccessibility, phenolic composition, and antioxidant activity [J]. *J Agric Food Chem*, 2015, 63(48): 10448-10458.
- [93] Zhang Z T, Jiang Y, Qi Y L, *et al.* Comparative study on *Angelica sinensis* after different processing with yellow rice wine in color, aromas, chemical components, and antioxidant activities [J]. *Food Chem X*, 2023, 19: 100822.
- [94] 陶益, 陈西, 李伟东, 等. 当归炮制品 9 种化学成分的比较研究 [J]. *中药新药与临床药理*, 2017, 28(1): 88-92.
- [95] 李硕, 李敏. 炮制对当归质量影响的研究概述 [J]. *时珍国医国药*, 2013, 24(12): 2986-2989.
- [96] 张景珍, 王新杰, 高慧, 等. 正交设计结合体外抗凝血实验优选酒当归炮制工艺 [J]. *中南药学*, 2020, 18(5): 765-769.
- [97] 杨柳, 李永强, 张芮萌, 等. 基于多指标响应面法优化土炒当归炮制工艺 [J]. *医药导报*, 2023, 42(1): 86-92.
- [98] Zhong L J, Hua Y L, Ji P, *et al.* Evaluation of the anti-inflammatory effects of volatile oils from processed products of *Angelica sinensis* radix by GC-MS-based metabolomics [J]. *J Ethnopharmacol*, 2016, 191: 195-205.
- [99] 纪鹏, 华永丽, 薛文新, 等. 当归及其不同炮制品的挥发油提取及成分分析 [J]. *天然产物研究与开发*, 2012, 24(9): 1230-1234.

[责任编辑 时圣明]